

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА ЗАВДАННЯ**

для практичних занять

з навчальної дисципліни

**«ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ»**

*(для студентів 1 курсу денної та 3 курсу заочної форм навчання спеціальності  
183 – Технології захисту навколишнього середовища, напряму підготовки  
6.040106 – Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване  
природокористування)*

**Харків  
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова  
2017**

Методичні вказівки та завдання для практичних занять з навчальної дисципліни «Прикладна механіка рідин і газу» (для студентів 1 курсу денної та 3 курсу заочної форм навчання, спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища, напряму підготовки 6.040106 – Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Ю. Л. Коваленко, Т. В. Дмитренко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова , 2017. – 25 с.

**Укладачі :** канд. техн. наук **Ю. Л. Коваленко**,  
канд. техн. наук **Т. В. Дмитренко**

**Рецензент** канд. техн. наук, доц. **В. Є. Бекетов**

*Рекомендовано кафедрою інженерної екології міст, протокол № 1 від 01.09.2016 р.*

## **ЗМІСТ**

ВСТУП.....	4
1 МЕТА, ЗАВДАННЯ, ПРЕДМЕТ ТА МІСЦЕ ДИСЦИПЛІНИ.....	6
2 ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ.....	7
3 ТЕМИ ТА ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ .....	8
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	24

## Вступ

Сучасний рівень розвитку промисловості, комунального й сільського господарства викликає значне зростання споживання чистої питної і технічної води, призводить до збільшення кількості скидів забруднених різними домішками відпрацьованих стічних вод. Зростання кількості викидів забруднюючих речовин призводить до погіршення стану атмосферного повітря. Тому в Україні на державному рівні неодноразово ухвалювалися рішення про підвищення ефективності заходів з охорони природи, раціональнішого використання водних ресурсів.

Для втілення цих рішень у життя надзвичайно важливою є розробка і широке впровадження замкнутих циклів водоспоживання, пов'язане з необхідністю очищення стічних вод від забруднень і подальшим поверненням їх у процес виробництва. Важливим також є застосування високоефективних технічних засобів очищення скидів та викидів від шкідливих домішок.

Фахівці, які займаються цими проблемами, мають бути добре обізнані з основами математичного моделювання процесів турбулентного переносу речовин з рідинами та газами у інженерних спорудах природоохоронного призначення, володіти відповідними розрахунковими методиками.

Все це обумовлює актуальність вивчення дисципліни «Прикладна механіка рідин і газів».

Приєднання України до Болонського процесу передбачає впровадження кредитно-модульної системи організації навчального процесу (КМСОНП), яка є українським варіантом ECTS. Програма побудована за вимогами кредитно-модульної системи організації навчального процесу.

Метою даного курсу є надання студентам теоретичних знань та практичних навичок у галузі розрахунків течій рідин і газів у інженерних спорудах природоохоронного призначення і відкритих руслах.

З метою найкращого засвоєння матеріалу студенти повинні до початку вивчення дисципліни опанувати знання і навички, що надаються за дисциплінами «Фізика» і «Вища математика».

Прикладна механіка рідин і газів (ПМРГ) - наука, що вивчає закони рівноваги і механічного руху рідини і розробляє методи застосування цих законів для вирішення завдань інженерної практики. ПМРГ, як механіка рідини, підрозділяється на гідростатику, в якій вивчаються закони рівноваги рідини, кінематику рідини, що вивчає зв'язки між геометричними характеристиками руху і часом (швидкості і прискорення), і гідродинаміку, що вивчає рух з урахуванням діючих сил. В даний час питання, що вивчає ПМРГ, охоплюють рух води не тільки в трубах, але і у відкритих руслах (каналах, річках), в різних спорудах природоохоронного призначення, рух ґрунтових вод, а також рух інших рідин (нафта, масла, різні розчини і так далі). ПМРГ, розглядаючи закони рівноваги і руху рідини, спирається на такі науки, як вища математика, фізика, теоретична механіка.

Метою цього курсу є надання студентам теоретичних знань та практичних навичок у галузі розрахунків течій рідин і газів у спорудах природоохоронного призначення і відкритих руслах.

В даних методичних вказівках формулюються теми та стислий зміст практичних занять з дисципліни «Прикладна механіка рідин і газів», відзначені у програмі та робочій програмі навчальної дисципліни, також рекомендується відповідна література. Таким чином дані вказівки містять необхідний мінімум інформації для складання студентами іспиту з дисципліни.

## **1 МЕТА, ЗАВДАННЯ, ПРЕДМЕТ ТА МІСЦЕ ДИСЦИПЛІНИ**

*Мета вивчення:* надання студентам теоретичних знань і практичних навичок у галузі розрахунків руху рідин і газів у спорудах природоохоронного призначення і відкритих руслах.

*Завдання:* надбання навичок використання сучасних теоретичних засад й методів розрахунку руху рідин і газів у інженерних спорудах і відкритих руслах у достатніх межах для їх професійної спеціалізації.

*Предмет дисципліни:* закони руху рідин і газів, розрахункові залежності, що використовуються у практиці інженерних розрахунків природних і інженерних систем.

*Місце дисципліни у структурно – логічній схемі навчального плану:*

Дисципліни, що повинні передувати вивченню даної дисципліни: «Вища математика» (математичний аналіз), «Фізика» (механіка, термодинаміка).

На дану дисципліну спирається вивчення наступних дисциплін: «Прикладна гідроекологія», «Прикладна аероекологія», «Моделювання і прогнозування стану довкілля».

*У результаті вивчення дисципліни студент повинен:*

– знати теоретичні засади й методи розрахунків руху рідин і газів у інженерних спорудах і відкритих руслах у достатніх межах для їх професійної спеціалізації.

– уміти □ застосовувати теоретичні знання й надбані вміння в інженерних розрахунках руху рідин і газів.

## **2 ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

Модуль 1. Прикладна механіка рідин і газів.

Змістовий модуль 1. Явища переносу.

Тема 1. Основні терміни і визначення. Рідина. Текучість рідин.

Рідини, що піддаються та не піддаються стисканню.

Тема 2. Фізичні властивості рідин та газів; перенос імпульсу. Щільність та питома вага рідин і газів. Стискання крапельних рідин. Спротив розтягувальним зусиллям. Здатність до стискання газоподібних рідин. Температурне розширення рідин. В'язкість рідин. Поверхнєве натягіння рідин. Капілярність. Ньютонівські та неньютонівські рідини. Сили, що діють в рідинах.

Тема 3. Гідростатичний тиск; рівняння гідростатики. Енергетичний зміст напору. Закон Паскаля. Гідростатичний тиск в точці. Основне рівняння гідростатики для нестискаємих рідин в полі сил тяжіння. Абсолютний, надлишковий та манометричний гідростатичний тиск в точці. Вакуум. Рівняння рівноваги для газів, що знаходяться під дією сил тяжіння.

Тема 4. Прилади для вимірювання тиску.

Тема 5. Закон Архімеда. Тиск на плоску та криволінійну поверхні.

Змістовий модуль 2. Турбулентність.

Тема 6. Основні види руху рідин; витрати рідини; рівняння нерозривності.

Тема 7. Рівняння Бернуллі для ідеальної та в'язкої рідин, його фізичний зміст.

Тема 8. Рівняння Нав'є-Стокса.

Тема 9. Гідравлічний опір; ламінарний та турбулентний рух.

Тема 10. Місцевий гідравлічний опір; місцеві втрати напору.

Тема 11. Гідравлічний розрахунок трубопроводів.

Тема 12. Аеродинамічний розрахунок газоходів.

Змістовий модуль 3. Механіка відкритих потоків.

Тема 13. Рух рідини у відкритих руслах. Рівняння рівномірного руху; емпіричні формули для швидкісного коефіцієнта.

Тема 14. Залежності між геометричними і гідравлічними характеристиками русел простих перетинів.

Тема 15. Розрахунок характеристик руху рідин у відкритих руслах.

### 3 ТЕМИ ТА ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Тема 1. *Основні терміни і визначення. Рідина. Текучість рідин. Рідини, що піддаються та не піддаються стисканню.*

В даний час питання, що вивчає ПМРГ, охоплюють рух води не тільки в трубах, але і у відкритих руслах (каналах, річках), в спорудах природоохоронного призначення, рух ґрунтових вод, а також рух інших рідин (нафта, масла, різні розчини і так далі) в трубопроводах і спорудах.

*Рідиною* називається суцільне середовище, що володіє здатністю легко змінювати свою форму під дією навіть вельми незначних сил. Найбільш характерна властивість рідини – текучість.

*Текучість* – це рухливість частинок рідини, що обумовлюється нездатністю її сприймати дотичну напругу в стані спокою. Рідина не може зберігати власну форму, вона приймає форму судини (резервуару, водоймища), в якій вона знаходиться.

Розрізняють рідини, що стискаються і нестискувані. Рідинами, що *стискаються*, є повітря і інші гази. До *нестискуваних рідин* зазвичай відносять так звані *краплинні рідини* (вода, нафта, змащувальні масла та ін.), хоча, строго кажучи, такі рідини володіють все ж таки незначною стисливістю, яку в деяких випадках руху рідини необхідно враховувати. Краплинна рідина має власний об'єм і вільну поверхню, тобто поверхню розділу її з газом.

*Зміст практичних занять:* обговорення мети і основних завдань дисципліни, шляхів застосування розрахунків руху рідин і газів у спорудах природоохоронного призначення і відкритих руслах, вивчення термінів і визначень, розгляд прикладів.

Тема 2. *Фізичні властивості рідин та газів; перенос імпульсу. Щільність та питома вага рідин і газів. Стискання крапельних рідин. Спротив розтягувальним зусиллям. Здатність до стискання газоподібних рідин. Температурне розширення рідин. В'язкість рідин. Поверхневе*



натяжіння рідин. *Капілярність. Ньютонівські та неньютонівські рідини. Сили, що діють в рідинах.*

Однією з найважливіших фізичних характеристик рідини є *щільність*  $\rho$ , тобто відношення маси  $M$ , кг рідини до займаного нею об'єму  $W$ ,  $m^3$ :

$$\rho = M / W, \text{ кг/м}^3$$

У гідравліці також використовується поняття *питомої ваги рідини*, що є відношенням ваги рідини  $\gamma$ , Н до її об'єму  $W$ ,  $m^3$ . Оскільки питома вага і щільність представляють відношення сили тяжіння і маси до одного і тому ж об'єму, то зв'язок між ними може бути виражений так:

$$\gamma = \rho \cdot g, \text{ Н/м}^3,$$

де  $g=9,807$  – прискорення вільного падіння,  $m/c^2$ .

Щільність реальної рідини мало змінюється при зміні тиску.

*Коефіцієнт об'ємного стиснення*  $\beta_p$ ,  $1/kPa$  – відносна зміна щільності, яка припадає на одиницю зміни тиску.

Для води орієнтовно можна вважати, що  $\beta_p \approx 5 \cdot 10^{-7}$ ,  $1/kPa$ .

Коефіцієнт об'ємного стиснення для газів:

$$\beta_p = \frac{1}{p}$$

*Температурний коефіцієнт об'ємного розширення*  $\beta_t$ ,  $K^{-1}$  – відносна зміна щільності, яка припадає на одиницю зміни температури.

Для води при температурі  $t = 10 - 20$  °C середнє значення  $\beta_t$  дорівнює  $0,00015 K^{-1}$ .

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення газів за нормальних умов

$$\beta_t = 1/T = 1/273,13 K^{-1} = 0,00366 K^{-1}.$$

*В'язкістю* називається властивість рідин чинити опір дотичним зусиллям при русі.

Розрізняють динамічну та кінематичну в'язкість рідини.

Відношення динамічної в'язкості до щільності називається кінематичною в'язкістю рідини:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Кінематична в'язкість зменшується із збільшенням температури.

Кінематична в'язкість зменшується із збільшенням температури.

Значення  $\nu$  для води при різних температурах  $t$  :

$t, ^\circ\text{C}$	0	5	10	20	40
$\nu, \text{cm}^2/\text{c}$	0,0178	0,0152	0,0131	0,0101	0,0066

При торканні рідини і твердого тіла можливі два випадки:

1) сили тяжіння між молекулами рідини більше, ніж між молекулами рідини і молекулами твердого тіла, тоді кажуть, що рідина не змочує тверде тіло;

2) сили тяжіння між молекулами рідини менше, ніж між молекулами рідини і молекулами твердого тіла, тоді кажуть, що рідина змочує тверде тіло.

У першому випадку в шарі рідини, що прилягає до твердого тіла, результуюча сила направлена у бік рідини, а в другому – у бік твердого тіла. У вузьких трубках (капілярах), занурених в рідини, через це форма меніска різна і рівні рідини в капілярах відрізняються від рівня вільної поверхні.

Явище зміни висоти рівня у вузьких трубках називають *капілярністю*.

Висота капілярного підйому води у скляній трубці

$$n = \frac{30}{d}, \text{ мм},$$

де  $d$  – діаметр трубки, мм.

Окрім звичайних (ньютонівських) рідин, існують аномальні (неньютонівські) рідини. До них відносяться змащувальні масла, нафтопродукти, колоїдні розчини.

*Зміст практичних занять:* рішення задач, розрахунки об'ємного стиснення та розширення рідин і газів при зміні температури та тиску, визначення фізичних властивостей рідин і газів.

Тема 3. *Гідростатичний тиск; рівняння гідростатики. Енергетичний зміст напору. Закон Паскаля. Гідростатичний тиск в точці. Основне*

рівняння гідростатики для нестискаємих рідин в полі сил тяжіння. Абсолютний, надлишковий та манометричний гідростатичний тиск в точці. Вакуум. Рівняння рівноваги для газів, що знаходяться під дією сил тяжіння.

Гідростатика – це розділ гідравліки, в якому вивчаються закони рівноваги рідин.

Сили, що діють в рідині: сили тиску, в'язкості і поверхневого натягнення.

Гідростатичний тиск характеризується такими основними властивостями:

1. Гідростатичний тиск направлений нормально до поверхні, на яку воно діє і створює тільки стискуючу напругу.
2. У будь-якій точці рідини гідростатичний тиск однаковий за всіма напрямками.

Гідростатичний тиск в крапці залежить тільки від її положення в просторі, тобто:

$$p = f(x, y, z).$$

У одиницях СІ тиск вимірюється в паскалях (Па), кілопаскалях (кПа), мегапаскалях (МПа).

У технічній літературі зустрічається інші одиниці вимірювання тиску.

$$1 \text{ технічна атмосфера} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10 \text{ м вод. ст.} = 735 \text{ мм рт. ст.} = 98\,070 \text{ Н/м}^2 = 98\,070 \text{ Па}.$$

Основне диференціальне рівняння гідростатики для рідини, що знаходиться під дією сили тяжіння, має такий вигляд:

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dz.$$

Інтегруючи, отримаємо для нестискуваної рідини:

$$\frac{p}{\rho \cdot g} + z = \text{const}.$$

Це рівняння називається *основним рівнянням гідростатики*.

Для нестискуваної рідини, що знаходиться в рівновазі під дією сили тяжіння, повний (абсолютний) гідростатичний тиск в точці:

$$p = p_o + \gamma \cdot h,$$

де  $p_o$  – тиск на вільній поверхні рідини;

$\gamma \cdot h$  – вага (сила тяжіння) стовпа рідини висотою  $h$  з площею поперечного перетину, рівній одиниці;

$h$  – глибина занурення крапки;

$\gamma$  – питома вага рідини.

Величина перевищення абсолютного тиску над атмосферним називається *манометричним*, або *надмірним* тиском у цій точці.

$$p_m = p - p_a = p_o + \gamma \cdot h - p_a.$$

Якщо тиск на вільній поверхні рівний атмосферному, то надмірний тиск:

$$p_m = \gamma \cdot h.$$

*Зміст практичних занять:* рішення задач, розрахунки тиску у нерухомій рідині і газі при зміні просторової координати.

#### Тема 4. Прилади для вимірювання тиску.

П'єзометр – простий прилад для вимірювання тиску.

Енергетичний сенс тиску: для всіх точок рідини, що покоїться, згідно попереднього виразу, п'єзометричний тиск є величиною постійною і вимірюється потенційною енергією частинки рідини віднесеною до її ваги.

Якщо абсолютний тиск в крапці менше атмосферного, то нестача абсолютного тиску до атмосферного називається **вакуумом**:  $p_{\text{вак}} = p_a - p$ .

Зігнута трубка, що показує висоту вакууму, називається вакуумметром. П'єзометром і вакуумметром зазвичай вимірюють невеликий тиск і вакуум. При великому вимірюваному тиску застосовують рідинні манометри (вакуумметри), заповнені ртуттю. При значно великому тиску користуватися ртутними манометрами незручно і для їх вимірювання застосовуються спеціальні пружинні манометри.

Існують дві групи манометрів: *рідинні й механічні*.

*Зміст практичних занять:* рішення задач, креслення принципових схем застосування приладів для вимірювання тиску, розрахунки тиску у нерухомій рідині і газі при зміні просторової координати.

Тема 5. *Закон Архімеда. Тиск на плоску та криволінійну поверхні.*

*Закон Архімеда:* на поверхню тіла, зануреного в рідину, діють сили тиску, рівнодіюча яких направлена проти сили тяжіння, прикладена до тіла в центрі ваги об'єму рідини, витисненої тілом, і рівна за величиною вазі рідини у витисненому об'ємі.

При розрахунку будівельних конструкцій і споруд важливо знати не тільки тиск в окремих крапках, але і загальну силу тиску рідини на споруду або його частину. Сила гідростатичного тиску (абсолютного) на плоску поверхню рівна множенню її питомої ваги на площу поверхні і на величину гідростатичного тиску на глибині занурення центру тяжіння поверхні.

$$F = p \cdot g \cdot S \cdot P_c$$

*Зміст практичних занять:* розгляд прикладів і вирішення задач, визначення розподілу тиску та сили тиску на плоску поверхню у гідростатичних системах.

Тема 6. *Основні види руху рідин; витрати рідини; рівняння нерозривності.*

*Гідродинаміка* – це розділ гідравліки, що вивчає закони руху рідини. Рідина розглядається в гідравліці як безперервне середовище, що суцільно заповнює цей простір без утворення порожнеч – континуум. Ця обставина, а також складність обліку сил тертя утрудняють вивчення законів руху рідини, тому вивчення цих законів починається на основі гідромеханіки нев'язкої (ідеальної) рідини, тобто без урахування сил тертя, а потім в отримані залежності вводяться уточнення, засновані на експериментальних даних.

Класифікація видів руху рідини заснована на ряду його ознак. Так, якщо

швидкість і тиск в даній точці змінюються з часом, то такий рух називається *несталим*. Якщо ж швидкість і тиск в даній точці не змінюються з часом, то такий рух називається *сталим*.

Сталий рух може бути рівномірним і нерівномірним. При *рівномірному* русі швидкість, а також глибина (у відкритому руслі) потоку не змінюються уздовж течії, а при нерівномірному русі ці елементи не залишаються постійними.

Рівномірний, як і нерівномірний, рух може бути напірним і безнапірним. При *напірному* русі потік стикається із стінками русла за всім периметром свого перетину, а при *безнапірному* русі лише за частиною периметру (при цьому потік має вільну поверхню). Якщо окрім поступальної ходи частинок рідини спостерігається також їх обертальний рух, то такий рух називається *вихровим*. Якщо обертання частинок відсутнє, то рух буде безвихровим.

Існують два методи вивчення руху рідини: метод *Лагранжа* і метод *Ейлера*. Метод Лагранжа вивчає зміну положення в просторі окремих частинок рідини, тобто траєкторії їх руху. Метод Ейлера вивчає поле швидкостей, тобто картину руху частинок рідини в окремих точках простору в кожен даний момент часу.

Метод Лагранжа, зважаючи на його складність, в гідродинаміці використовується рідко. Звичайне вивчення руху засновано на методі Ейлера.

Кількість рідини, що пройшла через живий перетин потоку за одиницю часу, називається *витратою потоку*. Витрата потоку складається з суми витрат елементарних струменів:

$$Q = \iint_{\omega} u \cdot d\omega.$$

У більшості випадків для характеристики зміни швидкості за живим перетином не вдається отримати необхідну теоретичну залежність, що викликає утруднення при обчисленні інтеграла. Для багатьох практичних завдань важливо знати витрату  $Q$  і не обов'язково знати місцеву швидкість  $i$  в кожній точці перетину. Для зручності розрахунків вводиться поняття *середньої швидкості в живому перетині  $V$* . Під такою швидкістю розуміється умовна,

однакова для всіх точок перетину, швидкість, при якій витрата потоку буде такою ж, як і при різних місцевих швидкостях. З урахуванням цього:

$$Q = \iint_{\omega} V \cdot d\omega = V \cdot \omega,$$

де  $\omega$  – площа живого перетину потоку.

Витрата вимірюється в м<sup>3</sup>/с. При розрахунку систем водопостачання і водовідведення витрата виражається також в л/с (1 л/с = 0,001 м<sup>3</sup>/с).

#### *Рівняння нерозривності рідини*

Умова руху рідини без утворення розривів (порожнеч) характеризується рівнянням нерозривності, яке виражає закон збереження маси

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0.$$

Це рівняння називається *рівнянням нерозривності в диференціальній формі для довільного руху нестискуваної рідини*.

$$u_1 d\omega_1 = u_2 d\omega_2.$$

Це рівняння називається *рівнянням нерозривності для елементарного струменя*.

Для потоку рідини у випадку, якщо між розрахунковими перетинами 1–1 і 2–2 немає відведення або притоки рідини, умова нерозривності є умовою постійності витрати і можна записати:

$$V_1 \omega_1 = V_2 \omega_2.$$

Це рівняння нерозривності для потоку, з якого виходить важлива особливість руху рідини – при зменшенні площі живого перетину середня швидкість збільшується, а при збільшенні площі середня швидкість зменшується.

*Зміст практичних занять:* розгляд прикладів і вирішення задач, розрахунки витрати та середньої швидкості рідин та газів.

Тема 7. *Рівняння Бернуллі для ідеальної та в'язкої рідин, його фізичний зміст.*

*Рівняння Бернуллі для потоку ідеальної (нев'язкої) рідини (без витрат*

механічної енергії), складене відносно довільно вибраній горизонтальній площині порівняння, має наступний вигляд:

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = H_n = \text{const.}$$

Ліва частина рівняння є сумою двох видів енергії: потенційною, такою, що складається з енергії положення  $z$  і енергії тиску, і кінетичної енергії, віднесених до одиниці ваги рухомої рідини. Її також називають гідродинамічним або повним тиском  $H_i$ . Величину  $H = z + \frac{p}{\gamma}$  називають *п'єзометричним тиском*, а величину  $V^2/2g$  - *швидкісним тиском*.

*Зміст практичних занять:* розгляд прикладів і проведення розрахунків параметрів потоку ідеальної (нев'язкої) рідини.

#### Тема 8. Рівняння Бернуллі для в'язкої рідин, його фізичний зміст.

При сталому, плавно змінному за рухом потоку реальної рідини, рівняння Бернуллі для двох перетинів трубки струму має наступний вигляд:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \Delta h_{w_{1-2}},$$

де  $V_1$  і  $V_2$  середні швидкості течії в живих перетинах;  $\alpha$  – коефіцієнт кінетичної енергії (Коріоліса), що приймається при турбулентному режимі руху рівним 1,0 – 1,1, а при ламінарному  $\alpha=2$  (у круглій трубі);  $\Delta h_{w_{1-2}}$  – витрати повного тиску або питомої енергії (енергія на одиницю ваги) на подолання сил гідравлічного опору руху потоку на ділянці між перетинами.

*Зміст практичних занять:* розгляд прикладів і проведення розрахунків параметрів потоку в'язкої рідини.

#### Тема 9. Гідравлічний опір; ламінарний та турбулентний рух.

*Гідравлічним опором* називають витрати механічної енергії рухомої реальної (в'язкої) рідини на роботу сил тертя, яка переходить в тепло. Величина гідравлічного опору залежить від режиму руху рідини – ламінарного або турбулентного.



*Ламінарним рухом* реальної рідини називають її впорядкований рух, при якому елементарні цівки є плавними лініями. Визначення можливості реалізації ламінарного режиму руху рідини в круглих трубах проводиться за величиною числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{Vd}{\nu},$$

де  $V$  – середня швидкість течії;  $d$  – діаметр труби;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Критерій встановлення ламінарного режиму:  $Re < 2320$ .

*Турбулентним рухом* реальної рідини називають її нестационарний рух, при якому для елементарних струменів властива хаотична, неврегульована і нестационарна картина їх розподілу в потоці.

Критерій реалізації турбулентного режиму руху рідини в круглих трубах:

$$Re > 2320.$$

*Зміст практичних занять:* розгляд прикладів і проведення розрахунків режиму руху рідини.

Тема 10. *Місцевий гідравлічний опір; місцеві втрати напору.*

Витрати повного тиску в потоці рідини на ділянці між двома живими перетинами складаються із витрат за довжиною і суми місцевих витрат:

$$\Delta h_{W_{1-2}} = h_L + \sum h_M,$$

де  $h_L$  – витрати тиску за довжиною потоку;  $\sum h_M$  – сума місцевих витрат тиску.

Витрати тиску за довжиною трубопроводу постійного перетину визначають за *формулою Вейсбаха-Дарсі*:

$$h_L = \zeta \frac{V^2}{2g},$$

де  $\zeta$  – коефіцієнт витрат.

При розрахунку витрат тиску за довжиною в круглих трубопроводах, коефіцієнт визначають за формулою:

$$\zeta = \lambda \frac{L}{d},$$

де  $\lambda$  – гідравлічний коефіцієнт тертя (коефіцієнт Дарсі);  $L$  – довжина ділянки трубопроводу, на якому визначаються витрати тиску;  $d$  – діаметр трубопроводу.

Термін «*місцеві гідравлічні опори*» означає місцеві витрати енергії потоку за рахунок локальних (місцевих) збуджень його рівномірності або плавної зміни. Такі місцеві збудження виникають при:

- вході потоку з резервуару в трубу при гострих входних кромках;
- вході в трубу з сіткою;
- при різкому розширенні трубопроводу;
- при різкому звуженні трубопроводу;
- при різкому повороті трубопроводу (гостре коліно);
- при вході потоку з труби в резервуар під рівень рідини.

Місцеві витрати тиску визначають за *формулою Вейсбаха*:

$$h_M = \zeta_M \frac{V^2}{2g},$$

де  $\zeta_M$  – коефіцієнт місцевого опору;  $V$  – середня швидкість потоку в перетині за місцем його обурення (окрім входу потоку в резервуар).

*Зміст практичних занять:* розгляд прикладів і проведення розрахунків витрат тиску за довжиною трубопроводу та місцевих витрати тиску.

## Тема 11. Гідравлічний розрахунок трубопроводів.

Для гідравлічного розрахунку трубопроводу *початковими даними є*:

- встановлена пропускна спроможність трубопроводу (витрата рідини);
- повний тиск в кінцевому перетині трубопроводу;
- вид перекачуваної рідини і її температура;
- матеріал трубопроводу;
- конфігурація трубопроводу (розташування, довжина і діаметр його колін).

*Завданням розрахунку є* визначення повного тиску в його початковому перетині, що забезпечує задану пропускну спроможність трубопроводу.

*Порядок розрахунку:*

- знаходимо питому вагу рідини, відповідну заданій температурі (за довідником);
- знаходимо коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, відповідний заданій температурі (за довідником);
- визначаємо еквівалентну шорсткість труб (за довідником);
- обчислюємо витрати тиску за довжиною кожного коліна (ділянки з постійним діаметром) трубопроводу за формулою Вейсбаха-Дарсі;
- обчислюємо сумарні витрати тиску по довжині трубопроводу, підсумовуючи витрати тиску у його колінах;
- визначаємо наявність і вид місцевих опорів;
- обчислюємо місцеві витрати тиску для кожного з місцевих опорів;
- обчислюємо сумарні місцеві витрати тиску в трубопроводі, підсумовуючи місцеві витрати тиску;
- обчислюємо повні витрати тиску, підсумовуючи сумарні місцеві витрати і витрати за довжиною трубопроводу;
- визначаємо повний тиск в початковому перетині трубопроводу, підставляючи в ліву частину рівняння Бернуллі величину повного тиску в кінцевому перетині і повні витрати тиску в трубопроводі.

*Зміст практичних занять:* розгляд прикладів і вирішення задач із аеродинамічних розрахунків трубопроводів.

## Тема 12. Аеродинамічний розрахунок газопроводів.

Для ізотермічних, низько напірних умов руху повітря у повітропроводах розрахунки проводяться аналогічно попередньому.

*Зміст практичних занять:* розгляд прикладів і вирішення задач із аеродинамічних розрахунків газопроводів.

## Тема 13. Рух рідини у відкритих руслах. Рівняння рівномірного руху; емпіричні формули для швидкісного коефіцієнта.

Рівняння рівномірного руху води у відкритому руслі:

$$V = w \cdot \sqrt{i}$$

де  $i$  – ухил дна русла;

$w$  – швидкісний коефіцієнт.

$$i = \frac{z_1 - z_2}{L}$$

Помножуючи обидві частини цього рівняння на площу живого перерізу потоку  $\omega$ , отримаємо рівняння Шезі:

$$Q = \omega \cdot w \cdot \sqrt{i}$$

Згідно з формулою М. М. Павловського для швидкісного коефіцієнта маємо:

$$w = \frac{1}{n} \cdot R^z,$$

де  $R$  – гідравлічний радіус потоку, визначуваний за формулою

$$R = \frac{\omega}{\chi},$$

де  $\chi$  – змочений периметр живого перерізу.

$$z = 0.37 + 2.5 n - 0.75(n - 0.1) R.$$

Коефіцієнт шорсткості русла  $n$  визначають за довідником, знаходиться в межах від 0,017 до 0,13. Так, для природних незасмічених русел (глина, пісок, дрібний гравій) з невеликими ухилами і вільною течією він дорівнює величині 0,025.

Більш простою для розрахунків є формула Маннінга:

$$w = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}}$$

*Зміст практичних занять:* розгляд прикладів і проведення розрахунків параметрів руху рідини у відкритих руслах.

Тема 14. Залежності між геометричними і гідравлічними характеристиками русел простих перетинів.

Русло трапецієдного поперечного перерізу з різною крутизною скосів.

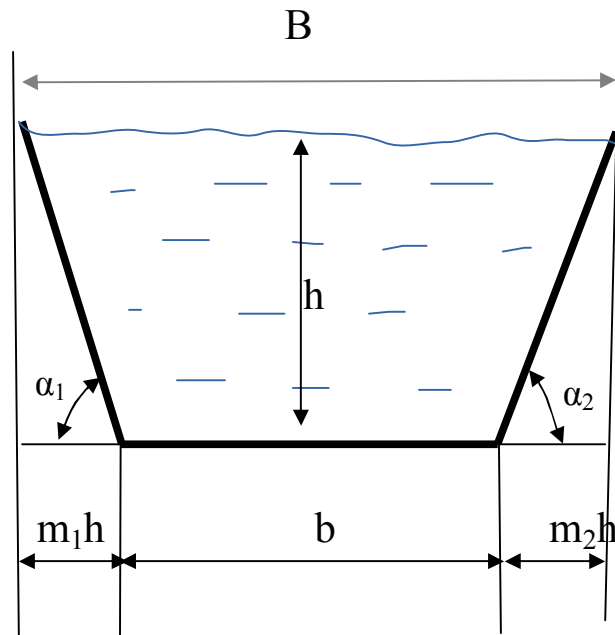


Рисунок 1. – Профіль русла трапецієдного поперечного перерізу

На рисунку 1 позначено:  $b$  – ширина русла по дну;  $B$  – ширина русла по вільній поверхні рідини;  $h$  – глибина потоку в перерізі;  $m_1$ ,  $m_2$  – коефіцієнти заставляння скосів, що визначаються за формулами:

$$m_1 = \cot(\alpha_1),$$

$$m_2 = \cot(\alpha_2).$$

Коефіцієнти заставляння укосів визначаються залежно від категорії ґрунтів в межах 3 – 3,5 для піщаних ґрунтів дорівнює 0,1 – 0,5 для скельних порід.

Площа живого перерізу потоку:

$$\omega = b \cdot h + \frac{(m_1 + m_2)}{2} h^2 = h \cdot \frac{B + b}{2}$$

Величину змоченого периметру розраховуємо за формулою:

$$\chi = b + h \cdot \left( \sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2} \right)$$

Гідравлічний радіус  $R$  і середня в перерізі швидкість потоку  $V$  для русел будь-якого поперечного перерізу відповідно дорівнюють:

$$R = \frac{\omega}{\chi}.$$

Русло прямокутного поперечного перерізу

За попередніми формулами для русел з прямокутними поперечними перерізами маємо:

$$\begin{aligned}\omega &= b h, \\ \chi &= b + 2h, \\ B &= b.\end{aligned}$$

*Зміст практичних занять:* розгляд прикладів і проведення розрахунків параметрів руху рідини у відкритих руслах.

Тема 15. *Розрахунок характеристик руху рідин у відкритих руслах.*

Розрахунок середньої швидкості течії і витрати потоку рідини у відкритому руслі

Якщо відомі форма поперечного перерізу русла, ухил дна, коефіцієнт шорсткості русла і глибина рівномірного руху потоку, то середню швидкість течії і його витрату визначають безпосередньо за рівнянням Шезі з урахуванням наведених вище формул.

Визначення глибини і середньої за перерізом швидкості потоку

При визначенні нормальної (побутової) глибини  $h$  і середньої в перерізі швидкості потоку  $V$  заданими є: форма і розміри поперечного перерізу, подовжній ухил дна  $i$ , стан (коефіцієнт шорсткості  $n$ ) поверхні дна і стінок русла, а також розрахункова витрата  $Q$ .

У загальному випадку таке завдання може бути вирішене способом підбору.

При цьому задаються глибини  $h_1, h_2, \dots, h_n$ , обчислюють відповідні ним площі живого перерізу потоку, змоченого периметра, гідравлічного радіусу  $R$ .

Знаходять значення швидкісних коефіцієнтів  $W$  і підраховують витратні характеристики.

*Зміст практичних занять:* розгляд прикладів і проведення розрахунків середньої швидкості течії, витрати, глибини потоку рідини у відкритих руслах.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Константинов Ю. М. Гидравлика : учебник. — Киев : Высшая школа, 1988. — 398 с.
2. Победря Б. Е. Основы механики сплошной среды / Б. Е. Победря, Д. В. Георгиевский. — Москва : Физматлит, 2006. — 272 с.
3. Чугаев Р. Р. Гидравлика : учебник для вузов / Р.Р. Чугаев. — Ленинград : Энергоиздат, 1982. — 672 с.
4. Справочник по гидравлике / [Под ред. В.А. Большакова]. — Ленинград : Высшая школа, 1984. — 343 с.
5. Коваленко Ю. Л. Конспект лекцій з дисципліни «Прикладна механіка рідин і газів» (для студентів 2 курсу денної та 3 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.040106 – Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування (професійне спрямування «Екологія та охорона навколишнього середовища», «Екологічна безпека»)) / Ю. Л. Коваленко, Т. В. Дмитренко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. — Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. — 53 с.
6. Методичні вказівки до самостійної роботи з навчальної дисципліни «Прикладна механіка рідин і газів» (для студентів 3 курсу заочної форми навчання напряму підготовки 6.040106 – Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування). / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Ю. Л. Коваленко, Т. В. Дмитренко. — Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. — 10 с.



*Навчальне видання*

Методичні вказівки та завдання

для практичних занять

з навчальної дисципліни

**«ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ»**

*(для студентів 1 курсу денної та 3 курсу заочної форм навчання спеціальності  
183 - Технології захисту навколишнього середовища, напряму підготовки  
6.040106 – Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване  
природокористування)*

Укладачі    КОВАЛЕНКО Юрій Леонідович,  
                  ДМИТРЕНКО Тетяна Володимирівна

Відповідальний за випуск *Я. О. Герасименко*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *Ю. Л. Коваленко*

План 2017, поз. 88 М

---

Підп. до друку 27.06. 2017 р.  
Друк на ризографі  
Зам. №

Формат 60×84/16  
Ум. друк. арк. 0,8  
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002  
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 від 11.04.2017 р.